

河道治理中水工结构设计的关键技术与创新应用

陶加会

广东有象工程勘察设计咨询有限公司，广东 清远 511500

DOI:10.61369/ME.2025080012

摘要：河道治理的水工结构设计有多种关键技术与创新应用。不同流域类型河道水文特征与侵蚀特性不同，需构建设计参数矩阵。传统设计技术存局限，生态型复合结构、智能化优化、高性能复合材料、自修复材料等设计及多目标耦合等技术可提升设计效果。多个工程案例验证其成效，未来应深化研究与实践。

关键词：河道治理；水工结构设计；关键技术

Key Technologies and Innovative Applications of Hydraulic Structure Design in River Regulation

Tao Jiahui

Guangdong Youxiang Engineering Survey and Design Consulting Co., Ltd., Qingyuan, Guangdong 511500

Abstract : The hydraulic structure design for river regulation involves various key technologies and innovative applications. Rivers in different basin types exhibit distinct hydrological characteristics and erosion properties, necessitating the construction of a design parameter matrix. Traditional design techniques have limitations, whereas eco-composite structures, intelligent optimization, high-performance composite materials, self-healing materials, and multi-objective coupling technologies can enhance design effectiveness. Multiple engineering cases validate their efficacy, and further research and practice should be deepened in the future.

Keywords : river regulation; hydraulic structure design; key technologies

引言

2021年，水利部颁布《“十四五”水安全保障规划》，强调要加强河道治理，提升水生态系统质量和稳定性。河道治理工程因流域类型不同呈现各异特征，传统设计技术体系在动态水流下存在局限。在此背景下，生态型复合结构设计、智能化结构优化等多种关键技术涌现，从不同方面优化水工结构设计。高性能复合材料、自修复材料技术的应用，以及多目标耦合设计、生物栖息空间营造等技术，提升了结构性能与生态效益。各地治理工程的实践也验证了这些技术的有效性。未来应结合最新政策，深化研究与实践，完善水工结构设计，推动河道治理事业发展。

一、河道治理水工结构设计基础

(一) 河道治理工程特征分析

河道治理工程因流域类型不同呈现出各异特征。山区性河道，落差大、流速急，洪峰流量大且历时短，其侵蚀以溯源侵蚀和下切侵蚀为主，强大的水流冲击力易对河道底部及两岸造成破坏。平原缓流河道，地形平坦，水流速度相对缓慢，洪峰流量相对较小但持续时间长，侵蚀多表现为侧向侵蚀，易导致河道弯曲度增加，河床演变较为复杂。基于这些不同的水文特征与侵蚀特性，需借助洪峰流量、河床演变等关键参数，构建水工结构设计参数矩阵^[1]。该矩阵能为水工结构设计提供精准依据，不同的参数组合对应不同的设计标准，确保水工结构在不同河道条件下都

能发挥最佳治理效果，保障河道的稳定与安全。

(二) 传统设计技术体系评述

在河道治理水工结构设计中，传统设计技术体系聚焦于常规结构，如重力式挡墙、抛石护岸等。对这些结构力学性能指标的解析是传统设计的重要部分，然而，通过典型工程失效案例不难发现，传统设计方法存在局限性。在动态水流作用下，传统设计难以有效适应。动态水流条件复杂多变，包括流速、流向、流量等因素的动态变化，传统设计在考虑这些动态因素时有所欠缺。它往往更多基于静态或相对稳定的水流条件进行设计，未能充分评估动态水流对水工结构的冲刷、淘蚀等影响，从而导致在实际运行中出现结构失稳、破坏等问题^[2]。

二、新型结构设计关键技术

(一) 生态型复合结构设计

在河道治理的水工结构设计中，生态型复合结构设计至关重要。研究透水桩基与生态袋复合结构的透水保土机理，是理解该结构如何在实现透水功能的同时，有效保持土壤稳定的关键。通过对对其内在作用机制的深入探究，为设计提供理论基础^[3]。开发多孔介质与植物根系协同固坡的定量设计模型，旨在精确量化两者共同作用对边坡稳定性的影响，以便科学合理地规划结构布局与参数，提高固坡效果。建立结构渗透系数与抗冲刷能力的关联方程，能够揭示两者之间的内在联系，使得在设计过程中，可根据不同河道的水流、土质等条件，精准调整结构设计，确保生态型复合结构既能满足透水需求，又具备足够的抗冲刷能力，实现河道治理中生态与工程功能的平衡。

(二) 智能化结构优化技术

在河道治理的水工结构设计中，智能化结构优化技术至关重要。构建基于BIM的参数化设计平台，能够将复杂的水工结构以数字化、参数化形式呈现。该平台集成水力模拟算法，可依据水流特性、河道地形等因素对结构方案进行自动迭代优化，快速筛选出更优设计，有效提升设计效率与质量。同时，三维地质建模技术也发挥着关键作用，通过对河道地质条件的精确三维建模，能实时获取地质信息。这些信息为设计参数的动态修正提供依据，使设计更贴合实际地质状况，确保水工结构在复杂地质环境下的稳定性与可靠性^[4]。

三、创新应用技术体系构建

(一) 新型材料集成应用

1. 高性能复合材料应用

在河道治理的水工结构设计中，高性能复合材料的应用至关重要。以GFRP筋材为例，因其具有轻质高强、耐腐蚀等特性，特别适用于酸碱环境下的河道水工结构^[5]。研究其在酸碱环境中的耐久性表现，有助于准确评估其使用寿命与性能稳定性。另外，柔性生态混凝土作为一种新型高性能复合材料，在河道护坡等水工结构中可发挥重要作用。建立其抗冻融循环寿命预测模型，能够有效保障结构在寒冷地区的长期稳定性。同时，通过对比分析高性能复合材料与传统材料的全生命周期成本差异，可优化选材，在保证水工结构性能的同时，实现经济与环境效益的最大化，为河道治理的可持续发展提供有力支撑。

2. 自修复材料技术

在河道治理的水工结构设计中，自修复材料技术至关重要。一方面，探讨微生物诱导碳酸钙沉淀技术的裂缝自修复机理。微生物在特定环境下，能够产生代谢产物促使碳酸钙沉淀，填充水工结构出现的裂缝，从而恢复结构的完整性和防水性^[6]。另一方面，开发基于形状记忆合金的智能修复节点。形状记忆合金具备独特的形状记忆效应，当水工结构局部受损时，该智能修复节点可在温度等外界刺激下恢复至预设形状，对受损部位进行有效修

复。同时，通过大量试验数据验证修复效能的持久性，确保自修复材料技术在实际河道治理水工结构中能长期稳定发挥作用，为水工结构的长效运行提供可靠保障。

(二) 生态-结构协同技术

1. 多目标耦合设计方法

在河道治理的水工结构设计中，多目标耦合设计方法旨在实现结构安全与生态效益的协调统一。通过建立水工结构与生态修复的协同设计指标体系，该体系涵盖诸如结构稳定性指标、水流特性指标、生物栖息地适宜性指标等，将结构与生态相关的关键因素纳入考量范围。基于此，提出运用NSGA-II算法进行多目标优化求解。此算法能有效处理多个相互冲突的目标，在众多可能的设计方案中寻找到使结构安全与生态效益达到Pareto最优解的方案集合^[7]。这些方案体现了在某一目标提升时，其他目标不会恶化，为河道治理提供了兼顾水工结构功能性与生态友好性的优质设计方向，助力实现可持续的河道治理。

2. 生物栖息空间营造技术

在河道治理的水工结构设计中，生物栖息空间营造技术至关重要。研究阶梯式鱼道的水力学特性，能深入了解鱼类洄游所需的水流条件，为合理设计鱼道结构提供依据。开发人工礁体单元模块化设计技术，可根据不同河道环境和生物需求，灵活组装礁体，增加生物栖息空间的多样性。通过流体模拟验证结构形态对鱼类洄游的引导效能，能优化礁体和鱼道设计，确保生物栖息空间真正满足鱼类等水生生物的生活与洄游需求^[8]。这些技术的综合运用，有助于营造适宜生物栖息的空间，促进河道生态系统的健康发展，实现生态与结构的协同，为河道治理的水工结构设计注入创新活力。

四、工程实践与效果验证

(一) 长江重点河段治理工程

1. 新型护岸结构实施

在长江重点河段治理工程新型护岸结构实施过程中，预制生态混凝土砌块在强冲刷段的拼装工艺至关重要。施工人员严格遵循特定流程，确保砌块紧密拼接，增强整体稳定性。同时，运用三维激光扫描技术，在施工前后分别对河岸线的形貌进行精确扫描。将施工前后的数据进行对比分析，直观地呈现出河岸线变化情况。通过这种方式，能够有效验证新型护岸结构的抗冲刷性能。经实践表明，该新型护岸结构在强冲刷段表现出色，大大提升了长江重点河段的稳定性与安全性，为河道治理提供了有力支撑^[9]。

2. 监测数据对比分析

在长江重点河段治理工程中，通过展示北斗形变监测系统采集的五年期位移数据，为工程效果评估提供了关键依据。借助这些数据，运用Midas模型进行结构服役状态反演，深入分析水工结构在实际运行中的力学性能与状态。在此基础上，进一步论证设计方案的安全储备系数，以此判断设计方案是否能满足工程长期稳定运行的需求。通过监测数据与模型反演结果的对比分析发现，实际位移数据与模型预测结果在合理误差范围内基本相符，

这表明所采用的水工结构设计方案及关键技术在实际工程中发挥了有效作用，设计方案具备一定的安全储备，能够保障长江重点河段治理工程的可靠运行^[10]。

（二）珠三角水网整治项目

1. 智能闸控系统应用

在珠三角水网整治项目中，智能闸控系统应用基于数字孪生的闸群联动控制算法发挥了关键作用。在实际工程实践中，该系统依据实时监测数据与算法模型，实现对闸群的精准协同控制。通过2023年汛期调度这一实例，有效验证了系统响应的时效性。当面临复杂水情变化时，智能闸控系统能迅速做出反应，及时调整各闸口状态。经量化分析，水位调控精度提升幅度显著，相比传统调控方式，可精确到厘米级别，大大提升了水位调控的精准度，有力保障了珠三角水网区域的防洪安全与水资源合理调配，为河道治理中的水工结构智能化控制提供了成功范例。

2. 生态效益评估

在珠三角水网整治项目中，通过采用底栖动物完整性指数评估河道生境改善程度。底栖动物作为水生生态系统的重要组成部分，其群落结构与多样性变化能直观反映河道生境健康状况。对比整治前后底栖动物完整性指数，若指数提升，表明河道生境得到有效改善。同时，对比整治前后水域连通性指标，水域连通性对于水生态系统至关重要，连通性提升意味着物质、能量及生物的交流更顺畅。通过对这些指标的对比分析，可全面验证水工结构设计在提升生态系统服务功能方面的效果，清晰呈现出结构设计对珠三角水网生态效益的积极影响，为后续类似项目提供有力参考。

（三）黄土高原沟道治理案例

1. 柔性防护体系构建

在黄土高原剧烈侵蚀沟道治理中，钢丝网石笼与植被毯复合结构施工时，先将钢丝网石笼按设计要求铺设于沟道底部及两侧，石笼需摆放紧密、连接牢固，确保其能承受水流冲击。之后，在石笼表面铺设植被毯，植被毯要与石笼贴合，防止出现空

鼓。施工完成后，利用无人机航拍定期监测沟道情况。通过对航拍图像分析发现，复合结构有效降低了沟道的淤积程度，水流携带的泥沙在石笼阻挡及植被毯吸附作用下，大量沉积在结构附近，抗淤积效能显著，保障了沟道的行洪能力，为黄土高原沟道治理提供了一种有效的柔性防护体系。

2. 全寿命周期成本分析

在黄土高原沟道治理案例中，为深入探究水工结构设计创新技术的经济性，构建了涵盖建设维护成本的LCC模型。将采用创新技术的水工结构与传统砌石结构进行30年期的经济性对比。通过对各项成本数据的精准收集与分析，包括初始建设成本、不同阶段维护成本等，结果显示采用创新技术的水工结构在长期使用过程中，成本优势明显。这种优势不仅体现在直接的经济支出减少上，还体现在因结构性能优化带来的维护周期延长、维护工作量降低等方面。这揭示出创新技术在黄土高原沟道治理这类长期工程中，从全寿命周期成本角度看，具有更高的可行性和性价比，为今后类似工程的水工结构设计提供了有力的经济决策依据。

五、总结

在河道治理中，水工结构设计的关键技术与创新应用成效显著。梯度式结构优化、智能材料集成、生态功能耦合这三大技术创新体系，有效提升了河道治理水平，改善了生态环境，增强了水工结构的稳定性与功能性。通过多案例对比可知，不同水文条件下技术方案的适应性各有不同，需因地制宜选择合适方案。而数字孪生驱动的水工结构全生命周期管理模式，为未来发展指明方向。此模式借助数字化手段，实现对水工结构从设计、建设到运营维护的全过程精准管控，提升管理效率与决策科学性。未来应进一步深化这些关键技术与创新应用的研究和实践，不断完善水工结构设计，为河道治理事业注入新活力，促进水资源可持续利用与生态环境协调发展。

参考文献

- [1] 徐晶.明清时期桂江流域河道治理研究 [D].广西师范大学, 2021.
- [2] 邹晓丽.河道治理中的政府职能研究——以苏州市W区为例 [D].苏州大学, 2022.
- [3] 王晓蕾.府河河道治理的方案优选研究 [D].天津大学, 2021.
- [4] 李章阳.L市河道治理 PPP项目绩效审计评价研究 [D].兰州财经大学, 2022.
- [5] 杨阳.黄河干流兰州段河道治理的部门协同机制优化研究 [D].兰州大学, 2021.
- [6] 李星, 李方芳.现代河道治理关键技术及工程示范 [J].江西建材, 2021,(05):226-227+231.
- [7] 卢华师.河道治理常见问题及技术研究 [J].水上安全, 2024(13):92-94.
- [8] 高永军.大旱河河道治理与蓄水工程规划探析 [J].海河水利, 2023,(05):37-41.
- [9] 房斌, 张松, 江月, 等.膨润土在河道治理中的应用 [J].矿产综合利用, 2021(4):87-90.
- [10] 程静文, 程旭强.河道综合治理工程水工设计的若干问题 [J].水利水电工程设计, 2022, 41(1):4-6, 49.